第47卷 第11期
2024年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 11
Nov. 2024

昆仑山北坡高山流域洪水变化特征

仇泽炜[1,2]， 方功焕[1]， 陈亚宁[1]， 朱成刚[1]， 梁文婷[1,2]，
邱彦峰[1,2]， 吕浩东[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，干旱区生态安全与可持续发展重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：洪水作为最具破坏力的自然灾害之一，在全球变暖背景下，高海拔山区洪水发生的强度和时间已经发生了显著变化，对人类社会和生态系统造成了深远的影响。因此，利用MissForest方法填补昆仑山北坡6大流域的出山口日流量序列，分析6条源流6个出山口站点1961—2022年的洪水强度、发生时间、起涨消退时间以及年最大洪水日平均流量的变化趋势。结果表明：(1) 97%的年最大1日流量(AMF)事件发生在夏季，乌鲁瓦提和同古孜洛克站的AMF呈增加趋势，而皮山、策勒、努努买买提兰干和且末站呈减少趋势，除皮山和乌鲁瓦提站外，其余站点AMF变化均显著。所有站点的春季最大1日流量(AMFSp)均呈增加趋势，其中，乌鲁瓦提、同古孜洛克和努努买买提兰干站显著增加。洪水发生时间方面，除皮山站的年最大1日流量发生的日期(AMFD)呈现出显著延迟趋势外，其余5个站点的AMFD显示出不显著的提前趋势；对于春季最大1日流量发生的日期(AMFDSp)，6个站点均呈现出不显著提前的趋势。(2) 在洪水起涨时间上，同古孜洛克和且末站延长，皮山等4个站点缩短；洪水消退时间上，皮山和策勒站延长，其他站点缩短，整体变化趋势不显著。年最大洪水日平均流量方面，皮山站显著增加，努努买买提兰干和且末站显著减少，其他站点减少趋势不显著。研究成果对提升干旱区水文生态效益、防洪减灾及区域水管理和灾害风险评估具有重要意义。

关 键 词：MissForest；最大1日流量；洪水过程；昆仑山北坡
文章编号：1000－6060(2024)11－1816－12(1816～1827)

在全球变暖的背景下，全球洪水的规模和发生时间发生了显著改变。21世纪以来，全球洪水事件频繁发生并不断加剧，其所造成的直接损失估计为每年1100×10[8] EUR，造成每年近5700人死亡，并且在更高变暖水平下，洪水的影响还在加大，直接影响人类福祉和全球社会生态系统的可持续发展[1-3]。

由于气候变暖，气温每上升1 ℃，大气持水能力增加约7%，导致极端降水更强烈，并可能导致更频繁的洪水灾害[4]。在全球范围内，巴西东北部、澳大利亚南部和地中海地区有变干的趋势，而在北欧等其他地区有变湿的趋势，洪水大小也有相同的变化趋势[5]。在洪水频率和洪水持续时间上，热带、亚热带和中纬度地区呈现增加趋势，其中2000年以后极端洪水持续时间超过30 d，而20世纪80年代和90年代极端洪水持续时间不足20 d[6]。在资料丰富地区，洪水发生时间的变化模式争议很小，基本认为洪水发生时间提前的区域主要分布在北美洲、欧洲和澳大利亚东北部，而洪水发生时间延迟的区域主要在亚马逊、塞拉多、南非、印度和日本[7-8]。在降雪比例较高的流域，冬季降雪减少导致径流提前，而在降雪比例较低的流域，冬季降雪减少导致径流推后[9]。在RCP6.0情景下，东南亚、东非和西伯利亚等地区

收稿日期：2024-03-18； **修订日期**：2024-06-11
基金项目：新疆维吾尔自治区面上项目(2022D01A348)；第三次新疆科学考察-昆仑山北坡水资源开发潜力及利用途径科学考察项目(2021xjkk0100)资助
作者简介：仇泽炜(1998-)，女，硕士研究生，主要从事干旱区水资源与生态水文研究. E-mail: qiuzewei22@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：方功焕(1989-)，女，博士，副研究员，主要从事干旱区高寒山区水文过程研究. E-mail: fanggh@ms.xjb.ac.cn

的洪水强度、频率、持续时间和波动性将增加[10]。在非洲南部、南美洲和澳大利亚南部，降水变率的增强将加剧极端水文事件的发生，极端洪水将呈增加趋势[11-12]。在高亚洲地区，由强降雨、融雪和冰川湖溃决引发的洪水，其频率也将显著变化[13-14]。

新疆昆仑山北坡区域是国家安全战略布局和“丝绸之路经济带”新疆核心区建设的重点区域，也是对气候变化响应敏感的区域。前期研究在洪水类型、洪水大小等方面获得了一定的研究进展。例如，Zhang等[15]对塔里木河四源流的洪水强度、频率和发生时间进行了分析，发现自20世纪80年代中后期以来，夏季和冬季的洪水强度有所增加。Fang等[16]通过数值试验结合随机森林方法研究了气候因子对洪水强度和时间的影响，结果表明昆仑山北坡的洪水强度与零度层高度相关。Luo等[17]通过多模式集合评估方法指出，温度是和田河上游山区流量变化的关键驱动因素，导致春季(3—5月)和田河流量急剧增加，融雪期提前并延长。Wang等[18]利用VIC-GM2模型对喀拉喀什河和玉龙喀什河的日流量进行了模拟，发现2条河流域的超阈值洪水和Q99洪水的频率在1.00~1.75次·a^{-1}和0.25~1.00次·a^{-1}之间。由于昆仑山北坡长期观测数据稀缺，特别是在一些小河流上，以上研究也多集中在有观测资料的大集水区，如和田河(玉龙喀什河集水区面积20096 km^2)，而对于不同地理位置和不同径流组成的小流域的长时序洪水研究极其缺乏。

本文通过MissForest缺失值插补法对1961—2022年昆仑山北坡6大流域的日流量进行插补，利用最大值抽样方法分析洪水事件的变化特征和趋势，并利用POT方法提取了洪水事件的起涨和消退时间。研究成果对提高干旱区的水生态效益、防洪减灾具有重要意义，并为区域水管理和灾害风险评估提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本研究选取昆仑山北坡6条源流，皮山河、和田河的喀拉喀什河和玉龙喀什河、策勒河、克里雅河和车尔臣河为研究区(图1、表1)，所有河流均发源于南部山区，主要依赖季节性山区降水和高山冰雪融水补给，这些河流穿过绿洲，最后流入北部沙漠[19]。南部高耸的山地系统阻挡了来自太平洋和印度洋的暖湿气流，从而对研究区的气候格局产生了决定性影响，南部山区为温带或寒温带气候带；中部的绿洲平原区为荒漠气候，是人类主要经济活动区；北部为塔克拉玛干沙漠，是极为典型的大陆荒漠气候区。

在全球变化背景下，本区的冰川积雪水文过程与极端水文事件变得更加复杂，主要表现在：(1) 在全球冰川普遍退缩的背景下，气温升高更为显著，

表1 昆仑山北坡各源流及对应的出山口水文站

Tab. 1 Hydrological stations at the mountain passes corresponding to various source streams on the northern slope of the Kunlun Mountains

河流	水文站	流域面积/km^2	水文站高程/m
皮山河	皮山	2227	2300
喀拉喀什河	乌鲁瓦提	19983	1850
玉龙喀什河	同古孜洛克	14575	1650
策勒河	策勒	2032	1515
克里雅河	努努买买提兰干	7358	1880
车尔臣河	且末	26822	1250

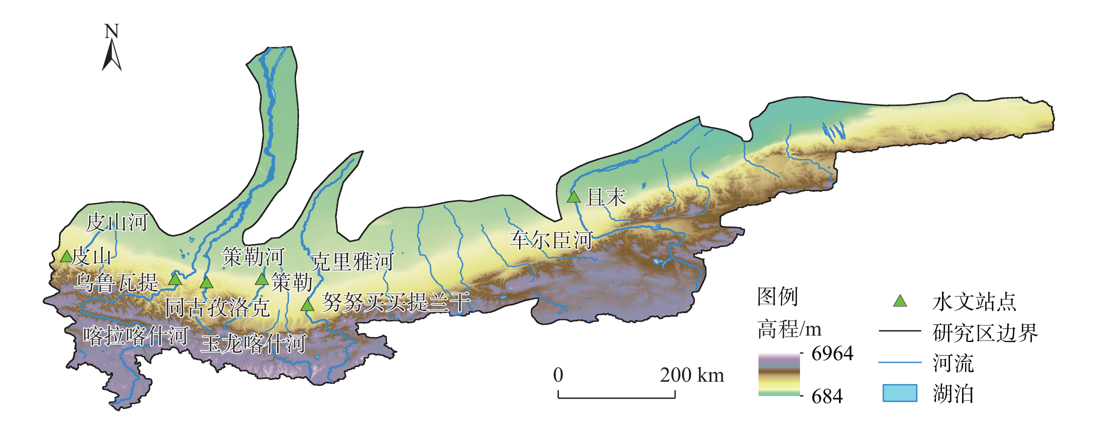


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

水文过程对气候变化的反应也更加敏感[3,20],昆仑山和喀喇昆仑山地区的冰川出现了退缩停滞甚至前进的现象;(2)极端水文事件增多增强,近10 a南疆有30%的台站日最大降水量刷新历史纪录,如2018年5月21日和田皮山1 h降水量达53.8 mm,接近当地的多年平均降水量;2020年4月17—24日,喀什共17站次出现暴雨,4 h降雨量106 mm。气候变化背景下,山区水循环加剧,以冰雪融水为主的河流流量变率增加,同时,低山区和前山带的暴雨增多,规模扩大,突发暴雨山洪频发,洪水风险上升,对当地农牧业造成巨大影响[20-23]。

1.2 数据来源

本研究所需数据包括地理信息基础数据、气象、冰川、土地利用和水文观测数据。数字高程模型(DEM)SRTM V3来源于NASA JPL,分辨率为30 m(https://www.jpl.nasa.gov/)。气候数据使用中国气象局0.25°×0.25°经纬度分辨率的格点化数据集(CN05.1),该数据集基于2400余个中国地面气象台站的观测资料插值得到,包括日降水量、平均气温、日最高气温和日最低气温[24-25],由中国气象局中国气象数据服务中心提供(https://data.cma.cn/)。中国第一次冰川编目数据集来源于“黑河计划数据管理中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)[26-27]。中国第二次冰川编目数据集(V1.0)数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn)[28-31]。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)土地利用遥感监测数据集[32]。水文观测数据采用研究区内6个水文站的日流量数据(图1),收集自“中华人民共和国水文年鉴”之内陆河湖水文资料,各水文站的日流量数据均不完整,缺失率在0.20~0.43之间(表2)。

表2 1961—2022年昆仑山北坡各水文站日流量数据缺失情况

Tab. 2 Missing daily flow data of hydrographic stations on the northern slope of the Kunlun Mountains from 1961 to 2022

水文站	缺失率	缺失年份
皮山	0.43	1990—2000,2003,2006,2012—2022
乌鲁瓦提	0.27	1999—2000,2004,2012—2022
同古孜洛克	0.20	1961,2012—2022
策勒	0.41	1990—2000,2004,2006,2012—2022
努努买买提兰干	0.40	1990—2000,2004,2006,2012—2022
且末	0.41	1975,1990—2000,2004,2006,2012—2022

1.3 研究方法

1.3.1 MissForest缺失值插补法 由于高山区水文资料稀缺,日流量缺失值较多,因此使用了一种基于随机森林(Random forest)的迭代插补方法(MissForest)对缺失数据进行插补。MissForest通过对许多未修剪的分类树或回归树进行平均,构成了一个多重插补方案。使用内置的随机森林袋外误差估计,能够在不需要测试集的情况下估计插补误差[33]。它可以分为3个主要步骤:首先,用平均值(对于连续变量)或最常见的类别(对于分类变量)替换缺失值;其次,将观测值作为训练集、缺失值作为预测集,输入到MissForest模型中,然后用MissForest模型的预测代替预测集,创建转换后的数据集;最后,当所有缺失值都完成插补后,一个插补循环就完成了,本研究每个站点重复插补20次[34]。MissForest的优点之一是它对不同类型的数据(包括连续型、分类型,甚至是混合型数据)都能有效地进行缺失值插补,同时其性能也不受可用数据长度的限制。此外,它不需要对数据进行过多的假设或进行数据转换,因此适用于各种数据集的插值处理。MissForest在准确率和计算效率方面均优于其他插补算法[35-37],并已在农业[38]、医学[39]、气象[40]、水文[34]等不同领域得到应用。在水文学中,MissForest已被证明能够插补日流量的数据缺口[41-44]。

在插补过程中,本文选择了日降水量、平均气温、日最高气温和日最低气温等变量作为输入数据。为了量化插补方案的准确性,使用克林-古普塔效率系数(KGE)、纳什效率系数(NSE)、决定系数(R^2)作为评价指标,这3个指标越接近1,模拟结果越接近真实值,模拟效果越好[45]。如果NSE>0.5或KGE>0.3,则模拟结果被认为具有高可信度[46],R^2>0.6或KGE>0.5,则说明模拟效果良好[43]。除了以上3个评价指标外,还计算了均方根误差(RMSE),以此衡量预测值与真实值之间的偏差,RMSE值越小,估计值越接近真实值。评价指标和RMSE采用计算公式如下:

$$\mathrm{KGE}=1-\sqrt{(r-1)^2+\left(\frac{\sigma_{\mathrm{sim}}}{\sigma_{\mathrm{obs}}}-1\right)^2+\left(\frac{\overline{X_{\mathrm{sim}}}}{\overline{X_{\mathrm{obs}}}}-1\right)^2} \quad (1)$$

$$\mathrm{NSE}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{\mathrm{obs}}^{i}-X_{\mathrm{sim}}^{i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{\mathrm{obs}}^{i}-\overline{X_{\mathrm{obs}}}\right)^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(X_{\text{obs}}^i - \overline{X_{\text{obs}}} \right) \times \left(X_{\text{sim}}^i - \overline{X_{\text{sim}}} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(X_{\text{obs}}^i - \overline{X_{\text{obs}}} \right)^2 \times \left[\sum_{i=1}^{n} \left(X_{\text{sim}}^i - \overline{X_{\text{sim}}} \right)^2 \right]}} \right\}^2 \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(X_{\text{obs}}^i - X_{\text{sim}}^i \right)^2} \quad (4)$$

式中：r 为皮尔逊相关系数；σ_{obs}为 观测值的标准差；σ_{sim} 为模拟值的标准差；$\overline{X_{\text{sim}}}$ 为模拟流量的平均值($m^3 \cdot s^{-1}$)；$\overline{X_{\text{obs}}}$ 为观测到流量的平均值($m^3 \cdot s^{-1}$)；n 为观测值的数量($m^3 \cdot s^{-1}$)；X_{obs}^i 为第 i 天观测到的流量($m^3 \cdot s^{-1}$)；X_{sim}^i 为当天模拟的流量($m^3 \cdot s^{-1}$)。

1.3.2 最大值抽样法 本文通过最大值抽样法(Block maximum)获得洪水样本，洪水由年度/季节最大1日量表示。最大值抽样方法是取一个时间步长(如年、季节、月份等)内的最大日流量作为该时间段内唯一的洪峰[47-48]。本文采用年最大1日流量(AMF)、春季最大1日流量(AMFSp)2个洪水指标衡量洪水强度，采用年最大1日流量发生的日期(AMFD)、春季最大1日流量发生的日期(AMFDSp)2个洪水指标研究洪水发生时间的变化，采用曼-肯德尔(Mann-Kendall)趋势检验方法检测洪水强度、时间和过程的变化趋势。

另外，本文基于AMF，统计了年最大洪峰的起涨、消退时间以及年最大洪水日平均流量。每场洪水的起始和结束时间采用美国水资源协会提出的判别标准对洪峰独立性进行判别[49]。

$$\begin{cases} D > 5 + \ln(A) \\ Q_{\min} < 3/4 \times \min(Q_1, Q_2) \end{cases} \quad (5)$$

式中：D 为连续2个洪峰的间隔时间；A 为2条支流的汇流面积(单位为平方英里，合2.59 km^2)；Q_1 和 Q_2 分别为连续2个洪峰的量级($m^3 \cdot s^{-1}$)；$Q_{\min}$ 为 Q_1 到 Q_2 之间的最小流量($m^3 \cdot s^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 日流量重建结果

研究区6个水文站的日流量数据均不完整，缺失率在0.20~0.43之间。通过MissForest算法对昆仑山北坡6个水文站1961—2022年的日流量数据进行插补，获得了完整的日流量序列。为了保证插值效果，在连续的日流量序列中，对每个站人工设置连续365 d的数据缺口，随机重复实验20次。插值结果表明(表3)，MissForest缺失值插补法在日流量重建方面表现出良好的效果，通过十折交叉检验，昆仑山北坡6个水文站的RMSE在2.39~29.84之间，KGE、NSE和 R^2 均在0.65以上，其中有5个站点的KGE高于0.75，4个站点的 R^2 高于0.75，3个站点的NSE高于0.75。同时，发现插值效果与日流量数据缺失率呈负相关，缺失率越低，KGE越高，模拟效果越好。尽管不同站点的数据缺失率和插补效果有所差异，但整体上，该算法在提高数据完整性和可用性方面表现出了令人满意的效果。

表3 昆仑山北坡各出山口水文站日流量重建效果

Tab. 3 Daily streamflow reconstruction effects at the hydrological stations of various mountain passes on the northern slope of the Kunlun Mountains

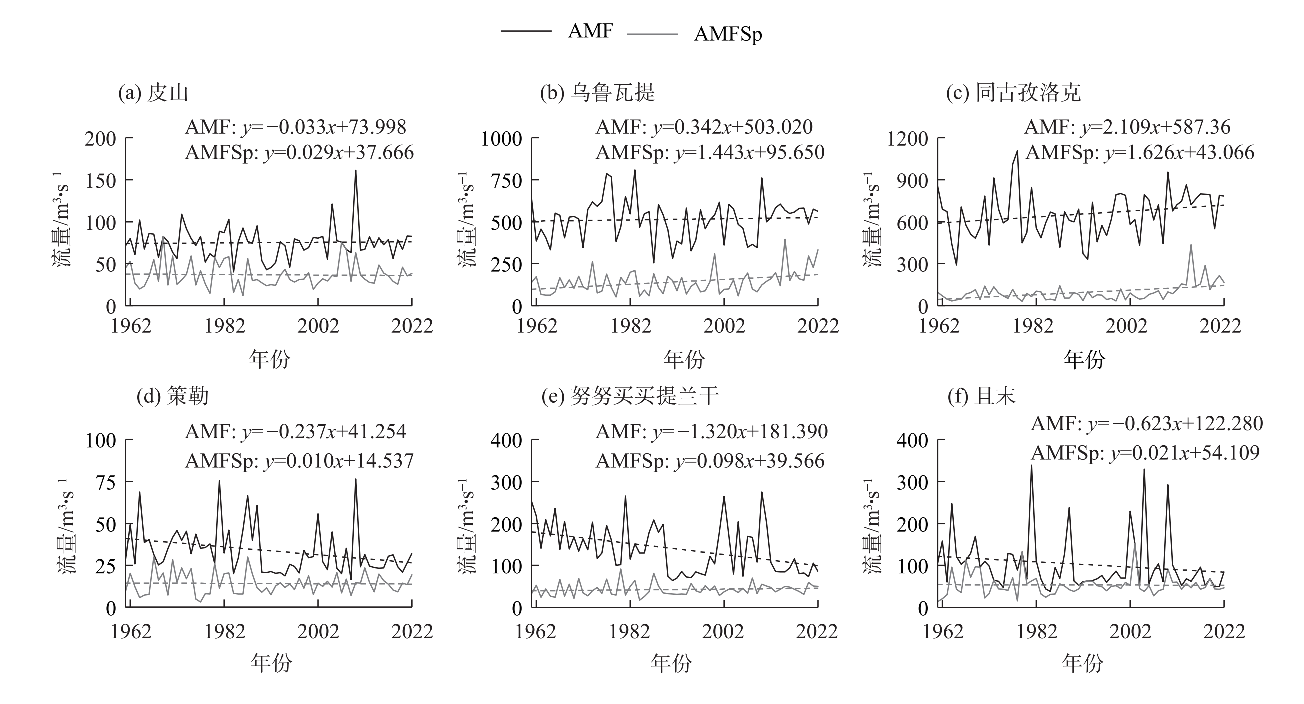
水文站	训练数据样本量/d	验证数据样本量(随机重复实验20次)	RMSE	KGE	NSE	R^2
皮山	12982	365	6.50	0.79	0.81	0.82
乌鲁瓦提	16562	365	27.41	0.83	0.71	0.80
同古孜洛克	18142	365	29.84	0.80	0.86	0.87
策勒	13360	365	2.39	0.78	0.70	0.74
努努买买提兰干	13574	365	11.14	0.84	0.77	0.77
且末	13276	365	7.63	0.70	0.68	0.68

注：RMSE为均方根误差；KGE为克林-古普塔效率系数；NSE为纳什效率系数；R^2 为决定系数。

2.2 洪水强度和发生时间的变化

1961—2022年昆仑山北坡6个水文站中有97%的AMF事件发生在夏季，因此，之后的分析主要集中于年和春季洪水变化。1961—2022年，乌鲁瓦提和同古孜洛克站的AMF呈现出增加趋势，仅同古孜洛克站的AMF呈现出显著增加趋势，增加速率为21.09 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$，乌鲁瓦提站的AMF虽然呈现出增加趋势，但是增加不显著(图2、表4)。与此同时，皮山、策勒、努努买买提兰干和且末4个站点的AMF则显示出减少趋势，其中，策勒、努努买买提兰干和且末3个站点的AMF在 $P<0.01$ 水平上显著减少，减小速率分别为2.37 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$、13.20 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$、6.23 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$。

对于AMFSp，所有站点的最大洪水强度均呈增加趋势。乌鲁瓦提和同古孜洛克2个站点的AMFSp在 $P<0.01$ 水平上显著增加，平均增加速率为15.35 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$；努努买买提兰干站的AMFSp以0.98 $m^3 \cdot (10a)^{-1}$ 的速率显著增加($P<0.05$)；其余站点的AMFSp呈现出不显著的增加趋势。



注：AMF为年最大1日流量；AMFSp为春季最大1日流量。

图2 昆仑山北坡6个水文站的洪峰流量变化

Fig. 2 Variations in peak streamflow rates at six hydrological stations on the northern slope of the Kunlun Mountains

表4 各水文站最大洪水变化趋势的Mann-Kendall检验结果

Tab. 4 Mann-Kendall test results of maximum flood change trend at each hydrographic station

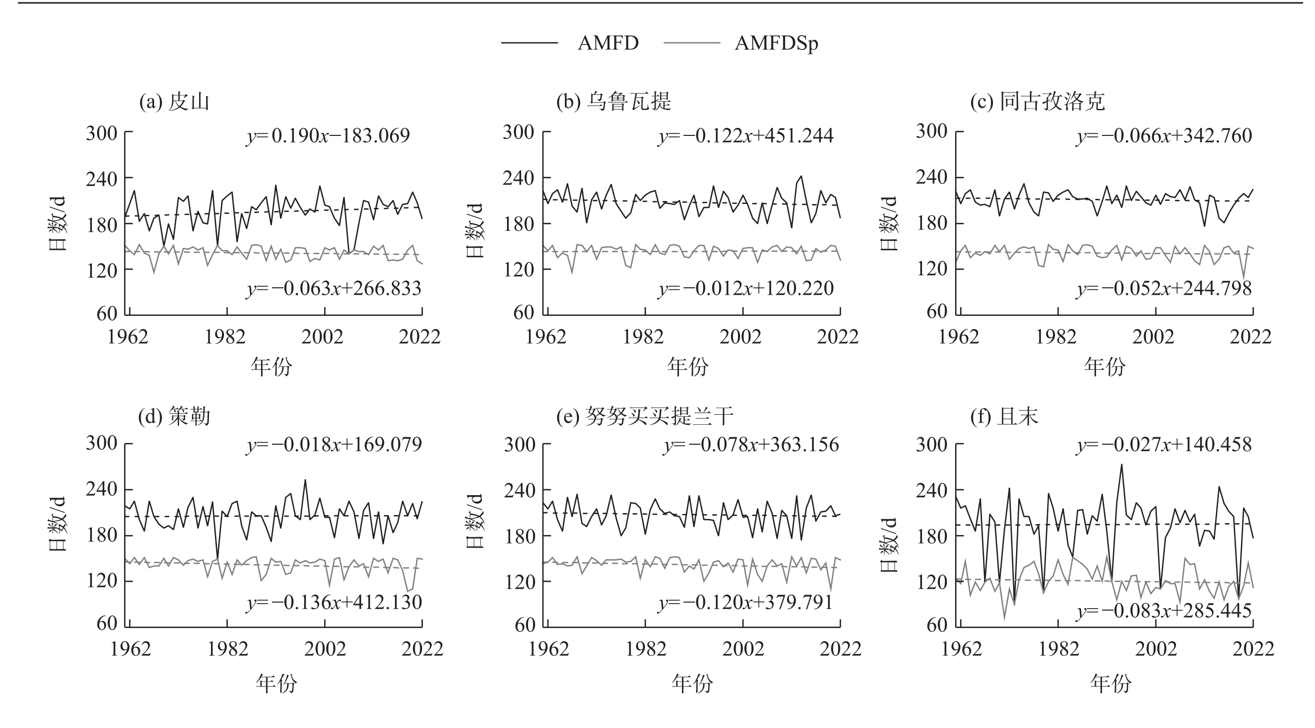
水文站	指标	Zc值	趋势	显著性	水文站	指标	Zc值	趋势	显著性
皮山	AMF	−0.373	↓	不显著	策勒	AMF	−2.900***	↓	99%
	AMFSp	0.541	↑	不显著		AMFSp	0.367	↑	不显著
	AMFD	1.476	→	90%		AMFD	−0.075	←	不显著
	AMFDSp	−1.085	←	不显著		AMFDSp	−1.073	←	不显著
乌鲁瓦提	AMF	0.560	↑	不显著	努努买买提兰干	AMF	−3.435***	↓	99%
	AMFSp	2.352***	↑	99%		AMFSp	1.817**	↑	95%
	AMFD	−0.878	←	不显著		AMFD	−0.554	←	不显著
	AMFDSp	−0.306	←	不显著		AMFDSp	−1.136	←	不显著
同古孜洛克	AMF	2.172**	↑	95%	且末	AMF	−2.489***	↓	99%
	AMFSp	3.031***	↑	99%		AMFSp	0.635	↑	不显著
	AMFD	−0.785	←	不显著		AMFD	−0.392	←	不显著
	AMFDSp	−0.630	←	不显著		AMFDSp	−0.891	←	不显著

注：Mann-Kendall检验中，Zc值为正数时表示增加趋势，Zc值为负数时表示下降趋势；Zc的绝对值在大于1.28、1.64、2.32时，分别表示通过了信度90%、95%、99%的显著性检验。**、***分别表示在0.05、0.01水平上显著。↑表示洪峰流量增加；↓表示洪峰流量减少；←表示洪峰出现日期提前；→表示洪峰出现日期延后。下同。

在洪水发生时间方面，乌鲁瓦提、同古孜洛克、策勒、努努买买提兰干和且末5个站点的AMFD显示出不显著的提前趋势，皮山站的AMFD在$P<0.1$的水平上呈现出延迟趋势(图3、表4)。具体来说，乌鲁瓦提等5个站点的AMFD平均提前了0.62 d·(10a)$^{-1}$，而皮山站的AMFD则平均延迟了1.90 d·(10a)$^{-1}$。对于AMFDSp，6个站点均呈现出不显著提前的趋势，平均提前0.78 d·(10a)$^{-1}$。

2.3 洪水过程变化特征

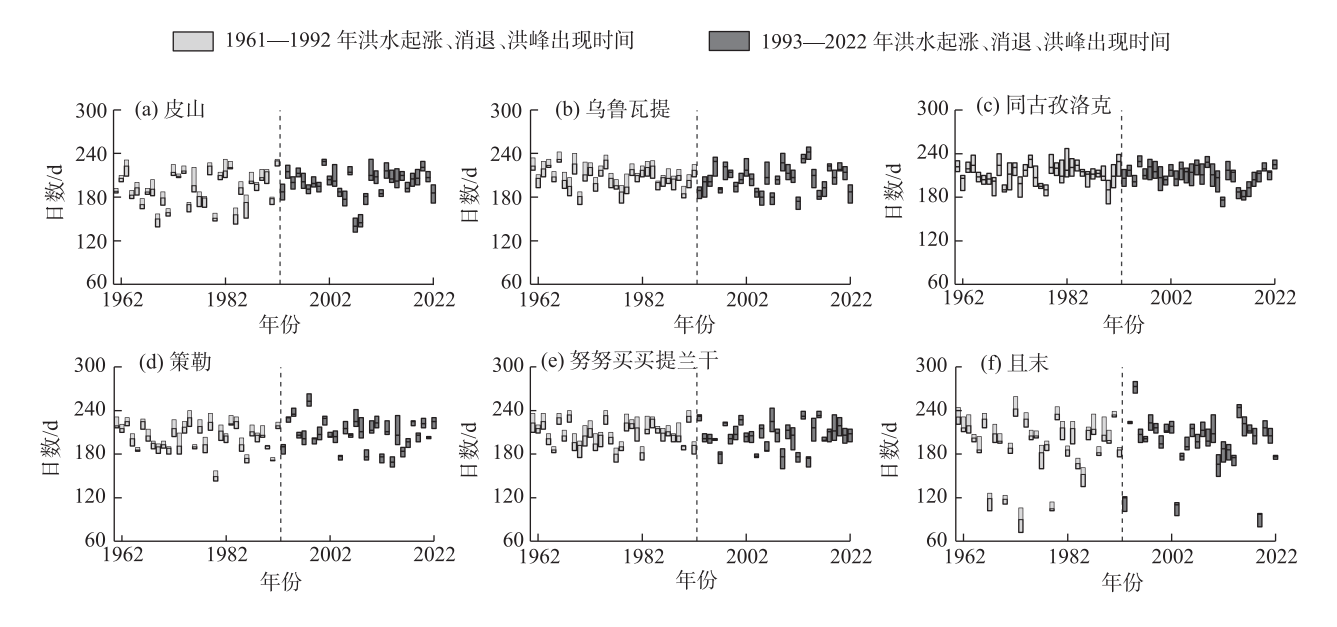
在洪水起涨时间方面，同古孜洛克和且末2个站点的洪水起涨时间在延长，由1961—1992年的平均10.03 d，延长到1993—2022年的平均10.51 d(图4、表5)；皮山、乌鲁瓦提、策勒和努努买买提兰干4个站点的洪水起涨时间在逐渐缩短，由1961—1992



注：AMFD为年最大1日流量发生的日期；AMFDSp为春季最大1日流量发生的日期。

图3 昆仑山北坡6个水文站洪水发生时间变化

Fig. 3 Changes in the timing of flood occurrences at six hydrological stations on the northern slope of the Kunlun Mountains



注：每个小柱子的下线代表洪水起涨的第一天，中线代表洪峰出现的那一天，上线代表洪水消退的最后一天。

图4 1961—2022年各水文站年最大洪水起涨时间和消退时间变化

Fig. 4 Changes in the rise and recession times of the annual maximum floods at each hydrographic station from 1961 to 2022

年的平均8.76 d，缩短到1993—2022年的平均8.17 d。在洪水消退时间方面，皮山和策勒站的洪水消退时间呈现出延长趋势，由1961—1992年的平均7.11 d，延长到1993—2022年的平均8.47 d；而其余4个站点的洪水消退时间则显示出了缩短的趋势，由1961—1992年的平均9.11 d，缩短至1993—2022年的平均7.92 d。所有站点的洪水起涨和消退时间的变化趋势均不显著。

在年最大洪水日平均流量变化方面(表5)，皮山站日均洪量在$P<0.05$水平上呈显著增加趋势，

表5 1961—2022年各水文站年最大洪水起涨时间和消退时间变化趋势

Tab. 5 Trends in the changes of rise and recession times of annual maximum floods at each hydrographic station from 1961 to 2022

水文站	1961—1992年			1993—2022年		
	平均起涨时间/d	平均消退时间/d	年最大洪水日平均流量/$m^3 \cdot s^{-1}$	平均起涨时间/d	平均消退时间/d	年最大洪水日平均流量/$m^3 \cdot s^{-1}$
皮山	8.09	7.19	38.37	7.47↓	9.43↑	44.23↑**
乌鲁瓦提	9.90	8.38	303.59	9.70↓	7.93↓	288.62↓
同古孜洛克	10.72	10.00	366.99	10.80↑	8.60↓	364.45↓
策勒	7.25	7.03	18.06	6.53↓	7.50↑	14.70↓
努努买买提兰干	9.78	8.19	88.31	8.97↓	7.13↓	74.36↓**
且末	9.34	9.87	43.22	10.22↑	8.00↓	40.31↓***

注：↓表示洪水的年最大洪水日平均流量或平均起涨或消退时间缩短；↑表示洪水的年最大洪水日平均流量或平均起涨或消退时间延长。

由1961—1992年的平均38.37 $m^3 \cdot s^{-1}$增加到1993—2022年的平均44.23 $m^3 \cdot s^{-1}$。其余5个站点都有不同幅度的减少，其中乌鲁瓦提、同古孜洛克和策勒站呈不显著减少趋势；努努买买提兰干站在$P<0.05$水平上呈显著减少趋势，由1961—1992年的平均88.31 $m^3 \cdot s^{-1}$减少到1993—2022年的平均74.36 $m^3 \cdot s^{-1}$；且末站在$P<0.01$水平上呈显著减少趋势，由1961—1992年的平均43.22 $m^3 \cdot s^{-1}$减少到1993—2022年的平均40.31 $m^3 \cdot s^{-1}$。

3 讨论

MissForest作为一种稳定的插补方法，在处理高缺失率和长时间连续缺口方面的表现优于其他插补方法[44]。本研究采用MissForest缺失值插补法对昆仑山北坡水文站的日流量数据进行了有效插补，显著提高了数据的完整性和准确性。这一方法的成功应用不仅解决了高山流域水文数据缺失的难题，而且为后续的洪水特性分析提供了可靠的数据基础。但此方法也有明显不足的地方，插值效果与日流量数据缺失率呈负相关，缺失率越高，KGE越低，这与He等[50]得到的结论相似。在日流量发生显著波动的情况下，MissForest未能准确模拟[43]，如且末站的日流量的变异系数为88.30%，明显高于其他河流，其插值效果也相对较差。在极端情况下，MissForest往往会低估峰值并高估低值[51]，如1999年7月30日—8月3日昆仑山北坡诸河的一次特大洪水，在皮山站未能准确模拟[52]。如何提高峰值模拟的准确性，最根本的还在于观测资料的准确性[53]。

自20世纪中期以来，全球水循环过程受气候变化影响显著，洪水等极端水文事件的发生频率正在上升[54]。随着全球升温，冰川正在加速消融与退缩，北半球冰川区和高纬度地区的河流流量已经出现了明显的增加趋势[55-56]。在欧洲、北美等平原地区洪水强度往往受到极端降水和融雪水的影响[7,20,57-58]，但是在昆仑山北坡高寒山区，洪水补给更加复杂，受到高山区冰川积雪融水、低山带暴雨以及冰湖溃决突发洪水的共同影响[59-61]，导致虽然同在昆仑山北坡区域，不同站点呈现出不同的变化趋势。乌鲁瓦提和同古孜洛克站的AMF呈增加趋势，而皮山、策勒、努努买买提兰干和且末站则呈减少趋势。利用站点观测插值资料CN05.1分析得知，乌鲁瓦提和同古孜洛克站的集水区的降水量总体呈增加趋势，增加速率分别为0.465 $mm \cdot a^{-1}$和0.358 $mm \cdot a^{-1}$，气温也呈上升趋势，上升速率分别为0.032 ℃$\cdot a^{-1}$和0.035 ℃$\cdot a^{-1}$。考虑到2个流域的冰川广布，乌鲁瓦提和同古孜洛克站的冰川融水占比高达45%~60%[62-63]，在约1963年和约2008年，2个流域的冰川面积分别从2216.8 km^2退缩到1849.1 km^2，从3047.0 km^2退缩到2805.0 km^2，总体退缩了16.59%和7.94%[32]。气温和降水的增加导致流域总体的融水径流和降雨径流水平增加，从而使得乌鲁瓦提和同古孜洛克站的AMF呈增加趋势。

对于皮山河流域，虽然其降水量呈现出明显增加趋势（0.555 $mm \cdot a^{-1}$），气温也呈现出明显增加趋势（0.029 ℃$\cdot a^{-1}$），但是由于其冰川面积小，仅70.5 km^2，占整个流域面积的3.6%，气温升高的融水增加效应微弱，同时，气温升高增强了以高覆盖度草地为主的流域蒸散发，在此综合作用下，流域的AMF呈现出不显著的下降趋势。对于其余3个流域（策勒、努努买买提兰干和且末），降水量微弱增加，冰川融水占比较低，气温升高明显（0.030~0.037 ℃$\cdot a^{-1}$），AMF呈略下降趋势（图5）。

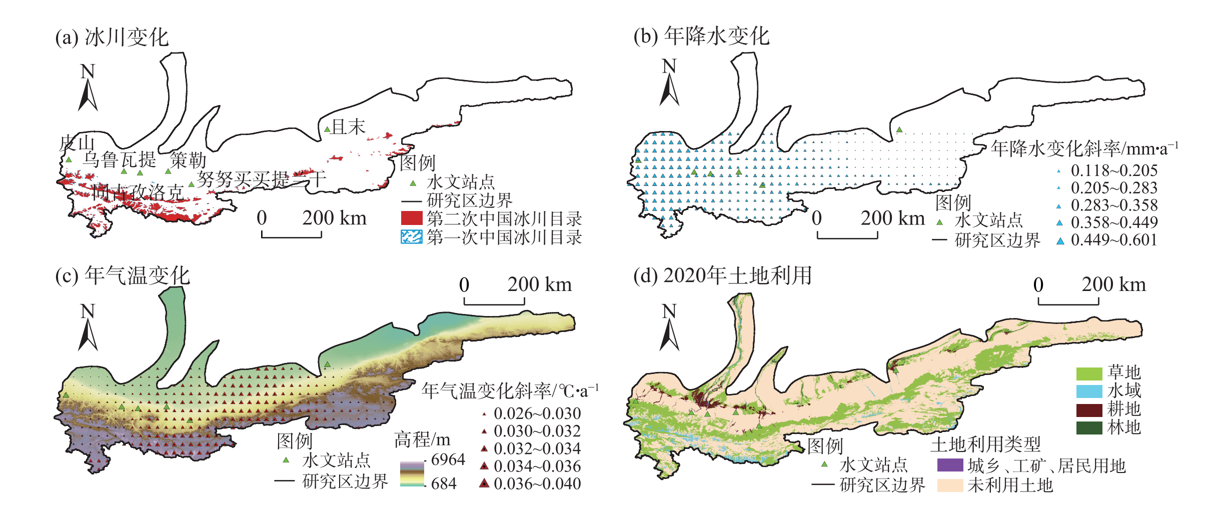


图5　昆仑山北坡6个典型流域的冰川空间分布、1961—2022年降水和气温的变化趋势以及2020年各个流域土地利用

Fig. 5　Spatial distribution of glaciers, precipitation and temperature changes from 1961 to 2022 and the land use in six catchments in 2020 on the northern slope of the Kunlun Mountains

20世纪80年代末以来，包括昆仑山北坡在内的西北干旱区呈现出极端降水增多、气候暖湿化的特点[64-66]，气候变暖导致融雪为主的河流的春季融水增强，进而导致AMFSp增大增强，这与全球观测到的融雪型流域的春季融水洪水增强一致[7,9]。春季融水的增加为昆仑山北坡灌溉农业的发展和生态修复提供了机遇[67]。

洪水发生时间受降水、融雪等因素的共同影响。昆仑山北坡的6个流域的AMFD均呈现出不显著的变化趋势。昆仑山北坡6个站点的AMFDSp也呈现出不显著提前趋势，这与气候变暖背景下全球以融水补给为主的河流的洪水发生时间提前的认知一致[7,9,68]。

针对且末站各洪水指标和洪水过程变化特征较大的曲线波动，本文统计了各高程带上每个流域的面积分布情况(图6)。且末站所在的车尔臣河流

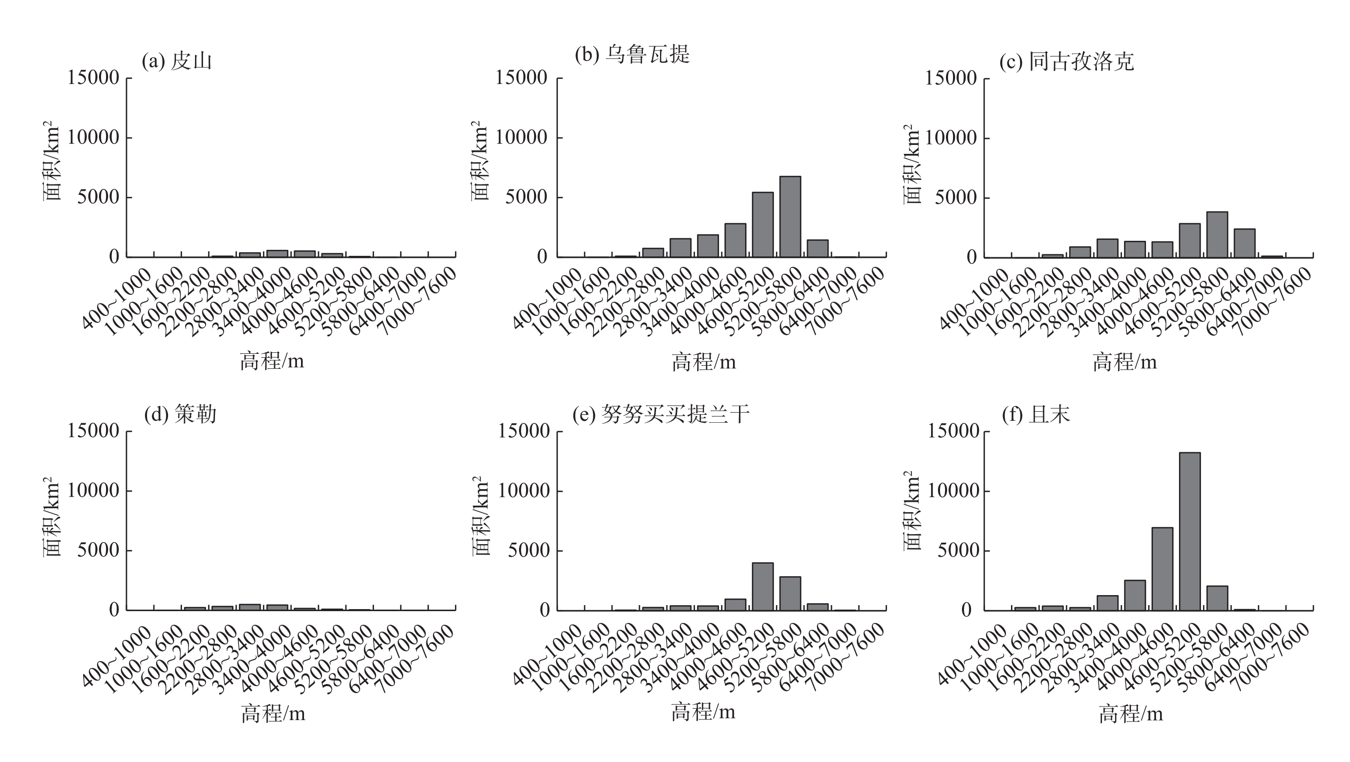


图6　各流域高程带面积分布情况

Fig. 6　Area distribution of elevation zones in each basin

域面积最大，由于高程分布集中，有48.95%的面积位于海拔4600~5200 m之间，主导水文过程的机制相对单一，所以导致本流域的径流波动较大。

在洪水起涨过程上，6条河流的起涨和消退时间虽然有增有减，但是变化不显著。洪水的起涨与消退速度变化与降水形态密切相关，尤其是最大降水率和降雨事件的质心时间[69]。另外，洪水的起涨与消退速度还受流域下垫面特征的影响，如在气候变化背景下高山裸土区植被增多、冻土层退化、冰川前缘冰川湖的形成、森林覆盖度等[70-74]。本区6个流域的洪水起涨速度均未发生显著变化，表明本区的土壤入渗能力、冻土层与草地/森林覆盖面积等的变化尚未引起洪水过程的改变。

4 结 论

（1）在洪水强度变化方面，昆仑山北坡97%的AMF事件发生在夏季。1961—2022年，乌鲁瓦提和同古孜洛克2个站点的AMF呈增加趋势，而皮山、策勒、努努买买提兰干和且末4个站点的AMF呈减少趋势。所有站点的AMFSp均呈增加趋势，其中乌鲁瓦提、同古孜洛克和努努买买提兰干3个站点显著增加。在洪水发生时间方面，5个站点的AMFD显示出不显著的提前趋势，皮山站则有显著延迟趋势；对于AMFDSp，6个站点均呈现出不显著提前的趋势。

（2）在洪水起涨时间方面，同古孜洛克和且末2个站点洪水起涨时间延长，皮山等4个站点缩短；在洪水消退时间方面，皮山和策勒2个站点呈延长趋势，其余4个站点呈缩短趋势，洪水起涨和消退时间变化趋势都不显著。在年最大洪水日平均流量变化方面，皮山站显著增加，努努买买提兰干和且末站显著减少，其他站点减少趋势不显著。

参考文献（References）

[1] Dottori F, Szewczyk W, Ciscar J C, et al. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming[J]. Nature Climate Change, 2018, 8: 781-786.

[2] Alifu H, Hirabayashi Y, Imada Y, et al. Enhancement of river flooding due to global warming[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 20687, doi: 10.1038/s41598-022-25182-6.

[3] IPCC. Climate change 2022: Mitigation of climate change[R]. Cambridge: IPCC, 2022.

[4] Tabari H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 13768, doi: 10.1038/s41598-020-74038-4.

[5] Lukas G, Julien B, Do H X, et al. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change[J]. Science, 2021, 371(6534): 1159-1162.

[6] Nsaaer N, Naresh D. Recent trends in the frequency and duration of global floods[J]. Earth System Dynamics, 2018, 9(2): 757-783.

[7] Zhang S L, Ahou L M, Yang Y T, et al. Reconciling disagreement on global river flood changes in a warming climate[J]. Nature Climate Change, 2022, 12: 1160-1167.

[8] Fang G H, Yang J, Li Z, et al. Shifting in the global flood timing[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 18853, doi: 10.1038/s41598-022-23748-y.

[9] Han J, Liu Z, Woods R, et al. Streamflow seasonality in a snow-dwindling world[J]. Nature, 2024, 629(8014): 1075-1081.

[10] Do H X, Zhao F, Westra S, et al. Historical and future changes in global flood magnitude-evidence from a model-observation investigation[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(3): 1543-1564.

[11] Chou C, Chiang J C H, Lan C W, et al. Increase in the range between wet and dry season precipitation[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(4): 263-267.

[12] Wasko C, Guo D L, Ho M, et al. Diverging projections for flood and rainfall frequency curves[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129403, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129403.

[13] Li D F, Lu X X, Walling D E, et al. High Mountain Asia hydropower systems threatened by climate-driven landscape instability[J]. Nature Geoscience, 2022, 15(7): 520-530.

[14] Pepin N, Bradley R S, Diaz H F, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(5): 424-430.

[15] Zhang Q, Gu X H, Singh V P, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River Basin, China: Changes, causes and implications[J]. Global and Planetary Change, 2016, 139: 44-55.

[16] Fang G H, Li Z, Yang J, et al. Changes in flooding in the alpine catchments of the Tarim River Basin, Central Asia[J]. Journal of Flood Risk Management, 2023, 16(1): e12869, doi: 10.1111/jfr3.12869.

[17] Luo M, Meng F H, Liu T, et al. Multi-model ensemble approaches to assessment of effects of local climate change on water resources of the Hotan River Basin in Xinjiang, China[J]. Water, 2017, 9(8): 584, doi: 10.3390/w9080584.

[18] Wang N, Liu W B, Wang H, et al. Improving streamflow and flood simulations in three headwater catchments of the Tarim River based on a coupled glacier-hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127048, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127048.

[19] 陈亚宁. 中国西北干旱区水资源研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 2-20. [Chen Yaning. Research on water resources in the arid region of northwest China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 2-20.]

[20] Sun P, Xiao M Z, Zhang Q, et al. Advance in hydrometeorological extremes research[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2018, 64(1): 28-36.

[21] Zhang Q G, Zhang F, Kang S C, et al. Melting glaciers: Hidden hazards[J]. Science, 2017, 356(6337): 495-495.

[22] Wu Y P, Yin X W, Zhou G Y, et al. Rising rainfall intensity induces spatially divergent hydrological changes within a large river basin[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 823, doi: 10.1038/s41467-023-44562-8.

[23] 吴素芬, 张国威. 新疆河流洪水与洪灾的变化趋势[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 199-203. [Wu Sufen, Zhang Guowei. Preliminary approach on the floods and their calamity changing tendency in Xinjiang region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 199-203.]

[24] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111. [Wu Jia, Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111.]

[25] Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4): 763-772.

[26] 吴立宗. 中国冰川编目信息系统[M]. 北京: 海洋出版社, 2004. [Wu Lizong. China glacier cataloging information system[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.]

[27] 吴立宗. 中国第一次冰川编目数据集[DB/OL]. [2020-01-19]. http://cryosphere.casnw.net/portal/metadata/bec2973b-e989-4058-b768-5e7d2bed14ab. [Wu Lizong. Dataset of the first glacier inventory in China[DB/OL]. [2020-01-19]. http://cryosphere.casnw.net/portal/metadata/bec2973b-e989-4058-b768-5e7d2bed14ab.]

[28] 刘时银, 郭万钦, 许君利. 中国第二次冰川编目数据集(V1.0)(2006—2011)[DB/OL]. [2019-10-11]. http://cryosphere.casnw.net/portal/metadata/6d44fd19-64d7-4af1-8e81-5fa717585b5b. [Liu Shiyin, Guo Wanqin, Xu Junli. The second glacier inventory dataset of China (version 1.0) (2006—2011) [DB/OL]. [2019-10-11]. http://cryosphere.casnw.net/portal/metadata/6d44fd19-64d7-4af1-8e81-5fa717585b5b.]

[29] 刘时银, 张勇, 刘巧, 等. 气候变化对冰川影响与风险研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017. [Liu Shiyin, Zhang Yong, Liu Qiao, et al. Impacts and risks of climate change on glaciers[M]. Beijing: Science Press, 2017.]

[30] Guo W Q, Liu S Y, Xu J L, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results[J]. Journal of Glaciology, 2015 61(226): 357-372.

[31] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16. [Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16.]

[32] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14. [Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 3-14.]

[33] Stekhoven D J, Buehlmann P. MissForest-non-parametric missing value imputation for mixed-type data[J]. Bioinformatics, 2012, 28(1): 112-118.

[34] Khampuengson T, Wang W. Novel methods for imputing missing values in water level monitoring data[J]. Water Resources Management, 2023, 37: 851-878.

[35] Lukas S, Markus D, Sophie B. Evaluating the performance of random forest for large-scale flood discharge simulation[J]. Journal of Hydrology, 2023, 590: 125531, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125531.

[36] Huang H, Liang Z M, Li B Q, et al. Combination of multiple data-driven models for long-term monthly runoff predictions based on Bayesian model averaging[J]. Water Resources Management, 2019, 33(9): 3321-3338.

[37] Hristos T, Georgia P, Andreas L. Super ensemble learning for daily streamflow forecasting: Large-scale demonstration and comparison with multiple machine learning algorithms[J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(8): 3053-3068.

[38] Saini P, Nagpal B. Analysis of missing data and comparing the accuracy of imputation methods using wheat crop data[J]. Multimedia Tools and Applications, 2024, 83: 40393-40414.

[39] Hasan M K, Abu S M M, Jungpil S, et al. A lite-weight clinical features based chronic kidney disease diagnosis system using 1D convolutional neural network[C]//2022 International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE). Gazipur: IEEE, 2022: 1-5.

[40] Alkabbani H, Ramadan A, Zhu Q, et al. An improved air quality index machine learning-based forecasting with multivariate data imputation approach[J]. Atmosphere, 2022, 13(7): 1144, doi: 10.3390/atmos13071144.

[41] Jūnis B, Inga R, Ezra H, et al. Assessing automated gap imputation of regional scale groundwater level data sets with typical gap patterns[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129424, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129424.

[42] Tang F, Hemant I. Random forest missing data algorithms[J]. Atatistical Analysis and Data Mining, 2017, 10(6): 363-377.

[43] Arriagada P, Karelovic B, Link O. Automatic gap-filling of daily streamflow time series in data-scarce regions using a machine learning algorithm[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126454, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126454.

[44] Zhou Y Y, Tang Q H, Zhao G. Gap infilling of daily streamflow data using a machine learning algorithm (MissForest) for impact assessment of human activities[J]. Journal of Hydrology, 2023, 627: 130404, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130404.

[45] Moriasi D N, Arnold J G, Van L M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
[46] Knoben W J M, Freer J E, Woods R A. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(10): 4323-4331.
[47] Feyen L, Dankers R. Impact of global warming on streamflow drought in Europe[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(17): D17116, doi: 10.1029/2008JD011438.
[48] Mallakpour I, Villarini G. The changing nature of flooding across the central United States[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(3): 250-254.
[49] Lang M, Ouarda T B M J, Bobée B. Towards operational guidelines for over-threshold modeling[J]. Journal of Hydrology, 1999, 255(3-4): 103-117.
[50] He G C, Chen Y N, Li Z, et al. Exploring denoising diffusion probabilistic model for daily streamflow gap filling in Central Asia typical watersheds[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 52: 101701, doi: 10.1016/j.ejrh.2024.101701.
[51] Liang W T, Chen Y N, Fang G H, et al. Machine learning method is an alternative for the hydrological model in an alpine catchment in the Tianshan region, Central Asia[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 49: 101492, doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101492.
[52] 毛炜峄, 玉素甫·阿布都拉, 程鹏, 等. 1999年夏季中昆仑山北坡诸河冰雪大洪水及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(4): 553-558. [Mao Weiyi, Abudula Yusup, Cheng Peng, et al. Extreme flood events in 1999 and their formation conditions in northern slopes of the middle Kunlun Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(4): 553-558.]
[53] Su F G, Pritchard H D, Yao T D, et al. Contrasting fate of western Third Pole's water resources under 21st century climate change[J]. Earths Future, 2022, 10(9): e2022EF002776, doi: 10.1029/2022EF002776.
[54] IPCC. AR6 synthesis report: Climate change 2023[R]. Geneva: IPCC, 2023.
[55] 刘俊国, 陈鹤, 田展. IPCC AR6报告解读: 气候变化与水安全[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 405-413. [Liu Junguo, Chen He, Tian Zhan. Interpretation of IPCC AR6: Climate change and water security[J]. Climate Change Research, 2022, 18(4): 405-413.]
[56] Hock R, Rasul G, Adler C, et al. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[R]. Cambridge: IPCC, 2019.
[57] Fowler H J, Lenderink G, Prein A F, et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(2): 107-122.
[58] Tradowsky J S, Philip S Y, Kreienkamp F, et al. Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in western Europe during July 2021[J]. Climatic Change, 2023, 176(7): 90, doi: 10.1007/s10584-023-03502-7.
[59] Bazai N A, Cui P, Carling P A, et al. Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 212: 103432, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103432.
[60] Zheng G X, Allen S K, Bao A, et al. Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(5): 411-417.
[61] Liu Y, Yao Y Z, Wang N, et al. Mapping the risk zoning of storm flood disaster based on heterogeneous data and a machine learning algorithm in Xinjiang, China[J]. Journal of Flood Risk Management, 2021, 14(1): e12671, doi: 10.1111/jfr3.12671.
[62] Fang G H, Yang J, Chen Y N, et al. How hydrologic processes differ spatially in a large basin: Multisite and multiobjective modeling in the Tarim River Basin[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(14): 7098-7113.
[63] 周聿超. 新疆河流水文水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999: 40-59. [Zhou Yuchao. Hydrology and water resources of Xinjiang river[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Health Press, 1999: 40-59.]
[64] Guan J Y, Yao J Q, Li M Y, et al. Historical changes and projected trends of extreme climate events in Xinjiang, China[J]. Climate Dynamics, 2022, 59(5): 1753-1774.
[65] Wei W, Zou S, Duan W L, et al. Spatiotemporal variability in extreme precipitation and associated large-scale climate mechanisms in Central Asia from 1950 to 2019[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129417, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129417.
[66] Wang Q, Zhai P M, Qin D H. New perspectives on 'warming-wetting' trend in Xinjiang, China[J]. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(3): 252-260.
[67] Feng F, Xu S G, Liu J W, et al. Comprehensive benefit of flood resources utilization through dynamic successive fuzzy evaluation model: A case study[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(2): 529-538.
[68] Berghuijs W R, Woods R A, Hutton C J, et al. Dominant flood generating mechanisms across the United States[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(9): 4382-4390.
[69] Shuster W D, Zhang Y, Roy A H, et al. Characterizing storm hydrograph rise and fall dynamics with stream stage data[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(6): 1431-1440.
[70] Karlsen R H, Bishop K, Grabs T, et al. The role of landscape properties, storage and evapotranspiration on variability in streamflow recessions in a boreal catchment[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 315-328.
[71] Cheng Y S, Sang Y F, Wang Z G, et al. Effects of rainfall and underlying surface on flood recession: The upper Huaihe River Basin case[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2021, 12: 111-120.

[72] 张俊兰, 罗继, 王荣梅. 近20 a新疆升温融雪(冰)型洪水频次时空变化及大气环流型分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 339-350. [Zhang Junlan, Luo Ji, Wang Rongmei. Combined analysis of the spatiotemporal variations in snowmelt (ice) flood frequency in Xinjiang over 20 years and atmospheric circulation patterns[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 339-350.]

[73] 胡可可, 何建村, 赵健, 等. 气候变化背景下尼雅河流域生态基流研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1472-1480. [Hu Keke, He Jiancun, Zhao Jian, et al. Ecological base flow in Niya River Basin under climate change[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1472-1480.]

[74] 刘宇, 管子隆, 田济扬, 等. 近70 a泾河流域径流变化及其驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 17-26. [Liu Yu, Guan Zilong, Tian Jiyang, et al. Runoff change and its driving factors in Jinghe River Basin in recent 70 years[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 17-26.]

Characteristics of flood change in alpine watershed on the northern slope of Kunlun Mountains

QIU Zewei[1,2], FANG Gonghuan[1], CHEN Yaning[1], ZHU Chenggang[1], LIANG Wenting[1,2], DI Yanfeng[1,2], LYU Haodong[1,2]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Flooding is one of the most devastating natural disasters, and under the influence of global warming, the magnitude and timing of floods in high-altitude mountain regions have experienced notable changes, significantly affecting human societies and ecosystems. This study employs the MissForest algorithm to impute daily discharge data for six mountain passes on the northern slope of the Kunlun Mountains, Xinjiang, China, analyzing trends in flood magnitude, timing, rise and recede durations for six source streams and mountain passes from 1961 to 2022, as well as the daily average annual maximum flood discharge. The key findings are as follows: (1) 97% of the annual maximum 1-day flow (AMF) events occur during the summer season. The AMF at Wuluwati and Tongguziluoke stations shows an increasing trend, while Pishan, Qira, Nunumaimaitilangan, and Qiemo stations exhibit a decreasing trend. Changes in AMF are statistically significant at all stations except Pishan and Wuluwati. The spring maximum 1-day flow (AMFSp) at all stations shows an increasing trend, with the most pronounced increases at Wuluwati, Tongguziluoke, and Nunumaimaitilangan stations. Regarding flood timing, the annual maximum 1-day flow date (AMFD) at five stations (excluding Pishan) exhibits an insignificant trend toward earlier occurrences. For the spring maximum 1-day flow date (AMFDSp), none of the six stations show a significant trend toward earlier timing. (2) Concerning the rise time of flooding, Tongguziluoke and Qiemo stations experienced an extension, while the other four stations showed a reduction. For the recede time of floods, Pishan and Qira stations have extended durations, whereas the other stations have shorter recede times, with no significant overall trend. The average daily discharge during the maximum flood has significantly increased at Pishan Station, significantly decreased at Nunumaimaitilangan and Qiemo stations, and has shown no significant change at the other stations. These findings are crucial for improving hydrological and ecological management, flood mitigation, disaster reduction, regional water management, and disaster risk assessment in arid regions.

Key words: MissForest; maximum 1-day flow; flood process; northern slope of the Kunlun Mountains